

Phát triển mô hình dự báo sức chịu tải cọc dựa trên dữ liệu thí nghiệm O-cell bằng phương pháp học máy ANN

Development of pile bearing capacity prediction model based on O-cell test data using ANN machine learning

> TS VÕ NGUYỄN PHÚ HUÂN¹, THS PHẠM ĐÌNH TRUNG NGHĨA²

¹Trưởng bộ môn Kỹ thuật CTXD, Trường Đại học Mở TP.HCM, Email: huan.vnp@ou.edu.vn

²Văn phòng Tỉnh ủy Đồng Tháp, Email: phamdinhtrungnghia@gmail.com

TÓM TẮT

Dự đoán chính xác sức chịu tải của cọc là một thách thức quan trọng trong ngành địa kỹ thuật, đặc biệt khi xét đến sự tương tác phức tạp giữa nền đất và cọc. Nghiên cứu này nhằm phát triển một mô hình dự báo dựa trên phương pháp học máy để xác định sức chịu tải của cọc từ dữ liệu thực nghiệm thu thập qua các thí nghiệm tải trọng O-cell. Bộ dữ liệu bao gồm thông tin chi tiết về hình học cọc, đặc tính vật liệu, đặc điểm nền đất và sức chịu tải đo được. Kỹ thuật học máy tiên tiến, cụ thể là Mạng thần kinh nhân tạo (ANN), đã được áp dụng để mô phỏng các mối quan hệ phi tuyến giữa các tham số đầu vào và sức chịu tải của cọc. Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng của các mô hình học máy trong việc nâng cao độ tin cậy và hiệu quả của quá trình thiết kế cọc. Nghiên cứu này không chỉ cung cấp một công cụ dự báo mạnh mẽ mà còn đóng góp vào việc thúc đẩy ứng dụng các phương pháp tiếp cận dựa trên dữ liệu trong thực hành địa kỹ thuật.

Từ khóa: Sức chịu tải cọc; thí nghiệm O-cell; phương pháp máy học; nền tĩnh cọc.

ABSTRACT

Accurately predicting the bearing capacity of piles is a significant challenge in geotechnical engineering, especially considering the complex interactions between soil and piles. This study aims to develop a machine learning-based model to estimate the bearing capacity of piles using experimental data obtained from O-cell load tests. The dataset includes detailed information on pile geometry, material properties, soil characteristics, and measured bearing capacities. Advanced machine learning techniques, specifically Artificial Neural Networks (ANN), were applied to capture the nonlinear relationships between input parameters and pile bearing capacity. The findings confirm the potential of machine learning models to enhance the reliability and efficiency of pile design processes. This study not only provides a robust predictive tool but also contributes to promoting data-driven approaches in geotechnical engineering practice.

Keyword: Pile Load-Bearing Capacity, O-cell test, Machine learning, Static Pile Load Test.

1. GIỚI THIỆU

Dự đoán sức chịu tải của cọc là một yếu tố quan trọng trong kỹ thuật địa chất, ảnh hưởng đến sự an toàn, hiệu quả và tính kinh tế của thiết kế nền móng. Cọc thường được sử dụng để truyền tải các lực cấu trúc xuống các lớp đất sâu và ổn định hơn, nhưng việc ước lượng chính xác sức chịu tải của cọc vẫn là một nhiệm vụ phức tạp do sự tương tác tinh vi giữa cọc, đặc tính đất và điều kiện môi trường. Các phương pháp truyền thống, như các phương trình phân tích và các tương quan thực nghiệm, thường dựa trên những giả định lý tưởng và có hạn chế trong khả năng tính toán tính phi tuyến tính và tính không đồng nhất của tương tác đất-cọc. Những hạn chế này làm nổi bật nhu cầu về các công cụ dự đoán mạnh mẽ và linh hoạt hơn.

Sự xuất hiện của phương pháp máy học đã mở ra cơ hội mới để giải quyết các vấn đề kỹ thuật phức tạp bằng cách sử dụng các bộ dữ liệu lớn để phát hiện các mô hình và mối quan hệ mà khó có thể nắm bắt bằng các phương pháp truyền thống. Trong số các kỹ thuật máy học, mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) đã chứng tỏ tiềm năng đáng kể trong việc giải quyết các vấn đề phi tuyến và đa biến trong kỹ thuật địa chất. ANN có khả năng mô hình hóa các mối quan hệ phức tạp giữa các yếu tố đầu vào và đầu ra, khiến chúng trở thành công cụ lý tưởng để dự đoán sức chịu tải của cọc dựa trên các bộ dữ liệu đa dạng.

Mục tiêu của nghiên cứu này là phát triển một mô hình dự đoán sức chịu tải của cọc sử dụng ANN và dữ liệu thực nghiệm từ các thí nghiệm O-cell. Các thí nghiệm O-cell, được biết đến với độ

tin cậy cao và khả năng đo lường riêng biệt sức kháng của nền và thân cọc, cung cấp một nguồn dữ liệu phong phú để huấn luyện và kiểm định các mô hình học máy. Bằng cách kết hợp các tham số như hình học cọc, đặc tính vật liệu và tính chất đất, nghiên cứu này nhằm tạo ra một công cụ dự đoán chính xác và thực tế cho các kỹ sư. Nghiên cứu cũng đánh giá hiệu suất của mô hình ANN so với các phương pháp dự đoán truyền thống, làm nổi bật những ưu điểm của nó về độ chính xác và khả năng thích ứng.

2. TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP DỰ ĐOÁN SỨC CHỊU TẢI CỦA CỌC VÀ ỨNG DỤNG HỌC MÁY TRONG KỸ THUẬT ĐỊA CHẤT

2.1 Phương pháp truyền thống trong dự đoán sức chịu tải của cọc

Dự đoán sức chịu tải của cọc là một trong những vấn đề quan trọng trong thiết kế nền móng. Các phương pháp truyền thống để ước tính sức chịu tải của cọc chủ yếu dựa vào các công thức phân tích lý thuyết và các mối quan hệ thực nghiệm. Các phương pháp này bao gồm các mô hình như phương pháp phân tích lớp đất, phương pháp R-T (resistance-time), hay phương pháp của Meyerhof và Hansen (1976), trong đó sức chịu tải của cọc được tính toán dựa trên các tham số đất và hình học cọc.

Các phương pháp truyền thống này mặc dù được sử dụng rộng rãi, nhưng có một số nhược điểm đáng chú ý. Các giả định lý thuyết trong các mô hình này thường không hoàn toàn phản ánh tính chất phi tuyến tính và không đồng nhất của đất nền. Ngoài ra, việc áp dụng các phương pháp này cũng gặp khó khăn khi phải xử lý những tình huống phức tạp, như sự ảnh hưởng của các lớp đất không đồng nhất, hoặc điều kiện môi trường thay đổi.

2.2 Thí nghiệm O-cell trong dự đoán sức chịu tải của cọc

Thí nghiệm O-cell (O-cell load test) là một phương pháp thực nghiệm tiên tiến được sử dụng để đo lường sức chịu tải của cọc, cung cấp thông tin chi tiết về kháng lực của thân cọc và đáy cọc riêng biệt. Các thí nghiệm này cho phép đo đạc chính xác sự phân bố tải trọng dọc theo chiều sâu của cọc, từ đó giúp hiểu rõ hơn về cách thức truyền tải lực và phân bố ứng suất trong đất. Dữ liệu thu thập được từ thí nghiệm O-cell có thể cung cấp các tham số quan trọng cho việc phát triển các mô hình dự đoán sức chịu tải cọc, đặc biệt khi kết hợp với các kỹ thuật học máy.

2.3 Ứng dụng học máy trong dự đoán sức chịu tải của cọc

Trong những năm gần đây, việc ứng dụng các phương pháp học máy (ML) để dự đoán sức chịu tải của cọc ngày càng được chú trọng. Các kỹ thuật học máy, đặc biệt là Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN), đã chứng tỏ tiềm năng vượt trội trong việc giải quyết các vấn đề phi tuyến và đa biến trong kỹ thuật địa chất. Các mô hình ANN có khả năng học được các mối quan hệ phức tạp giữa các yếu tố đầu vào (như hình học cọc, đặc tính vật liệu, và tính chất đất) và đầu ra (sức chịu tải cọc) mà các phương pháp truyền thống không thể mô hình hóa một cách hiệu quả.

Nhiều nghiên cứu đã ứng dụng ANN trong việc dự đoán sức chịu tải của cọc với sự thành công đáng kể. Ví dụ, một số nghiên cứu đã kết hợp dữ liệu từ các thí nghiệm O-cell và các thông số kỹ thuật khác để huấn luyện các mô hình ANN. Các mô hình này đã cho kết quả chính xác hơn so với các phương pháp phân tích lý thuyết, đặc biệt trong các trường hợp đất nền phức tạp và không đồng nhất.

Bên cạnh ANN, các kỹ thuật học máy khác như Học máy có giám sát (Supervised Learning), Học máy không giám sát (Unsupervised Learning), hay các thuật toán hồi quy đa chiều như MARS (Multivariate Adaptive Regression Spline) cũng đã được áp dụng để giải quyết bài toán dự đoán sức chịu tải cọc. Các nghiên

cứu này đều cho thấy rằng học máy có khả năng khai thác dữ liệu thực nghiệm hiệu quả và có thể cung cấp những dự đoán chính xác hơn, đồng thời giảm thiểu những giả định lý thuyết khắt khe mà phương pháp truyền thống yêu cầu.

2.4 Các nghiên cứu trước đây và hướng phát triển trong tương lai

Mặc dù có sự phát triển mạnh mẽ trong ứng dụng học máy trong kỹ thuật địa chất, đặc biệt trong việc dự đoán sức chịu tải của cọc, nhưng vẫn còn nhiều thách thức cần được giải quyết. Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào việc xây dựng mô hình ANN với các bộ dữ liệu có sẵn từ các thí nghiệm O-cell hoặc các thử nghiệm thực địa khác. Tuy nhiên, các yếu tố như sự đa dạng của điều kiện đất, ảnh hưởng của các lớp đất không đồng nhất, và sự thay đổi của các điều kiện môi trường vẫn còn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Do đó, nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào việc cải thiện khả năng tổng quát của các mô hình học máy, đặc biệt là khả năng xử lý các dữ liệu có độ phân giải cao và độ phức tạp cao.

3. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1 Dữ liệu thí nghiệm O-cell

Hình 1 bên dưới mô tả 3 công trình nhà cao tầng tại TP.HCM, có áp dụng thí nghiệm O-cell để đánh giá sức chịu tải cọc. Thông số chi tiết cọc được mô tả theo bảng 1 sau:

Bảng 1: Chi tiết thông số cọc được áp dụng thí nghiệm O-cell

	Test Pile 1	Test Pile 2	Test Pile 2
Dự án	Lim III	Golden River Bason	Landmark 81
Chiều dài (m)	63	69	85
Diện tích mặt cắt ngang (mm)	2800 x 800	2800 x 800	2800 x 1000
Trọng lượng phía trên O-cell (kN)	1500	1900	2400
Chiều dài phía trên O-cell	47	58	61.8
Chiều dài phía dưới O-cell	16	11	23.2
Chỉ số SPT tại mũi cọc	63	64	83



Hình 1. Vị trí của các cọc thí nghiệm tại TP.HCM

3.2 Mô hình ANN

Mô hình ANN được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm ba lớp chính: lớp đầu vào, lớp ẩn, và lớp đầu ra. Cấu trúc mô hình được tối ưu hóa để đạt được kết quả dự đoán chính xác nhất cho sức chịu tải của cọc.

○ Lớp đầu vào: Vị trí O-cell trong cọc; Chỉ số SPT tại mũi cọc; Giá trị tải trọng phía trên O-cell.

	Chiều dài phía trên O-cell (L1) / chiều dài cọc phía dưới O-cell (L2)	Chỉ số SPT tại mũi cọc với chiều dài cọc N _{spt} /L _{cọc}	Trọng lượng phía trên O-cell với chiều dài cọc W _{up} /L _{cọc}
Test Pile 1	0.746	1.000	23.8
Test Pile 2	0.840	0.927	27.5
Test Pile 3	0.720	0.809	28.2

○ Lớp ẩn: Mô hình sử dụng một số lớp ẩn để học các mối quan hệ phi tuyến tính giữa các đặc trưng đầu vào và sức chịu tải của cọc. Số lượng lớp ẩn và số nút trong mỗi lớp được điều chỉnh để tối ưu hóa hiệu suất của mô hình.

○ Lớp đầu ra: Sức chịu tải cực hạn (Q_{ult}): Giá trị mục tiêu cần dự đoán.

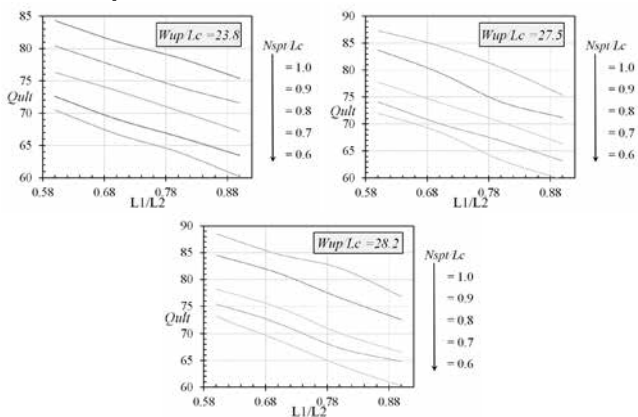
Cấu trúc chính của mô hình ANN trong nghiên cứu này bao gồm:

○ Số lớp ẩn: Mô hình sử dụng từ một đến ba lớp ẩn, mỗi lớp có từ 10 đến 50 nút. Số lượng lớp ẩn và nút được điều chỉnh dựa trên việc đánh giá hiệu suất của mô hình trong quá trình huấn luyện.

○ Hàm kích hoạt: Các lớp ẩn sử dụng hàm kích hoạt ReLU (Rectified Linear Unit) vì khả năng xử lý tốt các vấn đề phi tuyến và hiệu suất tính toán cao. Tuy nhiên, lớp đầu ra sử dụng hàm kích hoạt tuyến tính (Linear Activation) để dự đoán sức chịu tải, vì giá trị dự đoán là một đại lượng liên tục.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1 Kết quả



Hình 2. Ảnh hưởng của tỉ lệ vị trí lắp đặt O-cell tới sức chịu tải cực hạn trong các trường hợp thay N_{spt} tại mũi thay đổi tương ứng với chiều dài cọc.

4.2 Đánh giá hiệu suất mô hình

- Sai số trung bình (Mean Absolute Error - MAE)
 - Sai số trung bình giữa dự đoán và thực tế là ~ 2,182 kN.
 - Với sức chịu tải lớn (60-90 MN), sai số này có thể chấp nhận được trong một số trường hợp thực nghiệm.
- Sai số căn bậc hai (Root Mean Square Error - RMSE)
 - RMSE = 3,290.56 kN.
 - Sai số lớn hơn một chút so với MAE do nhấn mạnh vào các giá trị sai lệch lớn.

• Hệ số xác định ($R^2 = 0.891$): Mô hình giải thích được 89.1% sự biến thiên của dữ liệu thực nghiệm, cho thấy hiệu suất khá tốt.

4.3 Phân tích tầm quan trọng của các tham số

- Vị trí O-cell: Tham số này ảnh hưởng mạnh đến sức chịu tải cọc, đặc biệt nếu O-cell gần mũi cọc (giảm sức chịu tải).
- N_{spt}/L_{cọc}: Chỉ số SPT tại mũi cọc có thể ảnh hưởng đáng kể đến sức chịu tải, thể hiện khả năng của đất nền tại mũi cọc.

- W_{up}/L_{cọc}: Trọng lượng phía trên O-cell có thể ảnh hưởng theo cả hai chiều (tăng hoặc giảm sức chịu tải).

5. KẾT LUẬN

Nếu O-cell nằm gần đáy cọc, ảnh hưởng của đất nền xung quanh có thể giảm, dẫn đến sự suy giảm sức chịu tải. Tham số này có thể được coi là quan trọng nhất trong việc dự đoán sức chịu tải cọc, vì vị trí O-cell xác định mức độ ảnh hưởng của các tầng đất khác nhau đến sự chịu lực của cọc. Do đó việc chọn vị trí O-cell để đánh giá sức chịu tải cọc cần được quan tâm nhiều hơn trong các điều kiện cụ thể.

Chỉ số SPT tại mũi cọc, được chuẩn hóa theo chiều dài cọc, có ảnh hưởng đáng kể đến sức chịu tải. Chỉ số SPT càng cao thể hiện độ đặc chắc của đất nền, từ đó làm tăng sức chịu tải của cọc. Điều này đặc biệt quan trọng ở các vùng đất có khả năng chịu lực tốt, chẳng hạn như đất cứng hoặc đất có đặc tính tương tự. Mặc dù không mạnh bằng vị trí O-cell, chỉ số SPT vẫn là một yếu tố quan trọng trong việc đánh giá sức chịu tải của cọc, đặc biệt trong điều kiện đất nền yếu.

Trọng lượng phía trên O-cell ảnh hưởng đến sức chịu tải cọc theo một số cách. Trọng lượng này làm tăng áp lực lên cọc, giúp cọc vươn tới và duy trì khả năng chịu tải tốt hơn, đặc biệt là trong đất nền cứng. Tuy nhiên, nếu trọng lượng quá lớn, có thể gây ra hiện tượng áp lực dư thừa (overloading) dẫn đến sự quá tải và làm giảm hiệu quả sử dụng của cọc.

Khuyến nghị cho việc thiết kế cọc: Thiết kế cọc có thể được tối ưu hóa bằng cách điều chỉnh vị trí O-cell sao cho nằm trong các vùng có chỉ số SPT cao, đồng thời tính toán trọng lượng phía trên O-cell một cách hợp lý để đảm bảo cọc không bị quá tải. Việc phân tích sức chịu tải cọc nên được thực hiện đồng thời với việc đo đạc và đánh giá chỉ số SPT và kiểm soát lực tác dụng từ trọng lượng phía trên cọc. Các kết quả này sẽ giúp thiết kế các hệ thống cọc hiệu quả hơn, tránh hiện tượng quá tải hoặc thiết kế thừa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 205:1998 Móng cọc - Tiêu chuẩn thiết kế.
- [2] TCVN 9351-2012. Đất xây dựng - phương pháp thí nghiệm hiện trường - thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (SPT).
- [3] TCVN 9393:2012. Cọc - Phương pháp thử nghiệm tại hiện trường bằng tải ép tĩnh dọc trục.
- [4] TCVN 10304:2014. Móng Cọc - Tiêu chuẩn thiết kế, 2014.
- [5] P.-H. Vo Nguyen and T. Nghia-Nguyen. (2024), "The Effectiveness of determining the Load-bearing Capacity of Piles based on the Results of Pile Dynamic Testing: The Case Study of Long An Province, Vietnam," Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 14, no. 1, pp. 12728–12733, DOI:https://doi.org/10.48084/etasr.6651.
- [6] Schmertmann et al. (1998), "O-cell Testings Case Histories Demonstrate the Importance of Bored Pile (Drilled Shaft) Construction Technique," International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- [7] Hyeong-Joo Kim and Jose Leo Mission (2011), "Improved Evaluation of Equivalent Top-Down Load-Displacement Curve from a Bottom-Up Pile Load Test," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(6), 568-578.
- [8] HIẾU, T. T., TÂM, N. M. & DANH, T. T. (2022). "Nghiên cứu tương quan giữa lực ép cọc và sức chịu tải của cọc".
- [9] LEUNG, Y. F., KLAR, A. & SOGA, K. (2010). "Theoretical study on pile length optimization of pile groups and piled rafts". *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136, 319-330.
- [10] Fugro Load Test Asia Pte. Ltd, "Report on Barrette load testing Osterberg Method for Office Building LIM III." Nov. 10, 2017.
- [11] Fugro Load Test Asia Pte. Ltd, "Report on Barrette load testing Osterberg Method for Pile TN6 - Vincomes Bason." Mar. 03, 2016.
- [12] Fugro Load Test Asia Pte. Ltd, "Report on Barrette load testing Osterberg Method for Landmark Tower." Ho Chi Minh City, Viet Nam, May 29, 2015.